

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH  
STUDIÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2012

Augustin Bernard

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH  
STUDIÍ

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Informatika a logistika

# Prostorové audio efekty

## Spatial audio effects

Bakalářská práce

Autor: Augustin Bernard

Vedoucí práce: Doc. Ing. Zbyněk Koldovský, Ph.D.

Ústav informačních technologií a elektroniky

Konzultant: Ing. Ondřej Hnilička

Ústav informačních technologií a elektroniky

V Liberci 2. ledna 2012

## Zadání bakalářské práce

1. Nastudujte základní způsoby simulace pozice akustického zdroje ve stereofonním signálu.
2. Naměřte dvoukanálové impulsní odezvy místnosti a pomocí nich simulujte pohyb akustického zdroje.
3. Implementujte efekt reverb pomocí FFT a metody overlap-add.
4. Vytvořte grafické uživatelské rozhraní v Matlabu pro zpracování WAV souborů vytvořeným efektem, kde bude možné zvolit průběh pohybu zdroje po místnosti.

# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis

## Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o prostorových zvukových efektech obecně a hlouběji se zabývá efektem reverb, který simuluje přirozený dozvuk v určitém prostoru. Součástí je zpráva o provedení experimentu měření impulsní odezvy několika místností pro možnost simulace přirozeného dozvuku pomocí konvoluce signálu s impulsní odezvou. Výsledkem je podkladový materiál pro vlastní efekt, který kombinuje konvoluční reverb s proměnnou pozicí akustického zdroje. K práci je přiložena aplikace umožňující uživateli upravit libovolnou zvukovou nahrávku ve formátu WAV pomocí tohoto hybridního efektu výběrem různých trajektorií v simulovaných prostorech. Aplikace je naprogramována v prostředí Matlab.

## Abstract

This bachelor thesis deals with the spatial audio effects in global and in more detail it deals with the reverb effect, that is considered as a simulation of the natural sound waves propagation in an enclosed space. The report also contains description of an impulse response measurement in several rooms, an experiment done to have author's own feed for a convolution reverb. A product of the experiment is a hybrid effect connecting changeable position of an acoustic source in a stereophonic signal with the convolution reverb. There is an application included that lets users process a sound wave with the effect mentioned above. The application runs in Matlab graphical user interface.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Základní pojmy a simulace pozice akustického zdroje</b>	<b>9</b>
1.1	Akustika . . . . .	9
1.2	Zvukové vlnění a jeho vlastnosti . . . . .	10
1.2.1	Charakteristika barvy zvuku . . . . .	11
1.3	Simulace pozice zvukového zdroje . . . . .	11
1.3.1	Impulsní odezva . . . . .	12
1.3.2	Prostorové rozložení ve stereofonním signálu . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Prostorové zvukové efekty</b>	<b>15</b>
2.1	Reverb . . . . .	16
2.2	Význam přirozeného dozvuku . . . . .	17
2.3	Různé způsoby simulace prostorového zvuku . . . . .	18
2.3.1	Pružinový reverb . . . . .	18
2.3.2	Digitální reverb . . . . .	19
2.3.3	Konvoluční reverb . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Měření impulsní odezvy</b>	<b>22</b>
3.1	Funkce jednotlivých mikrofonů . . . . .	22
3.2	Volba podkladového materiálu . . . . .	23
3.3	Problematika měření impulsní odezvy . . . . .	25
3.3.1	Vybavení . . . . .	25
3.4	Průběh experimentu a zpracování dat . . . . .	26
3.4.1	Výpočet impulsní odezvy . . . . .	27
3.5	Konvoluce . . . . .	29
3.6	Overlap-add algoritmus . . . . .	30

3.6.1	Využití linearity konvoluce a FFT . . . . .	31
3.7	Prostorová a časová mapa . . . . .	31
3.7.1	Časová mapa . . . . .	31
3.7.2	Prostorová mapa . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Aplikace Stereopanner Universal</b>	<b>36</b>
4.1	Matlab GUI . . . . .	36
4.1.1	Doporučené nastavení efektu . . . . .	38
4.2	Ukázky signálů a jejich spektrogramů . . . . .	39
<b>A</b>	<b>Zdrojové kódy</b>	<b>43</b>
A.1	odezva.m . . . . .	43
A.2	mmse.m . . . . .	43
A.3	fcn_SU_LeftRight.m . . . . .	45

# Úvod

Problematika spojená se simulací přirozeného dozvuku k docílení co nejrealističtějšího zvuku zvukové nahrávky zahrnuje více oborů, než by si člověk mohl představit. Jedná se o mezioborovou záležitost týkající se digitálního zpracování signálů, matematické algebry, akustiky a jejích podoborů a také hudby. Proto nebude zřejmě nikdy úplně exaktní. K dosažení správných výsledků je totiž potřeba zapojit kromě logického myšlení i sluch. Jedná se o značně subjektivní metodiku z toho důvodu, že zahrnuje právě hudbu, která je dokonale abstraktním uměním a každá osoba ji vnímá po svém. Tohoto přístupu se využívá i profesionálně, kdy každá firma, vytvářející prostorové efekty, používá vlastní postupy, o kterých by se dalo říci, že jsou alchymistické. Proto jsem se rozhodl, ač s vybavením z větší míry amatérským, prostorový zvukový efekt se simulací pohybu akustického zdroje v uzavřeném prostoru realizovat. Ve zprávě je uvedeno, na základě jakých principů jsem efekt zkonstruoval a jaký byl koncept jednotlivých kroků jeho tvorby.



# Kapitola 1

## Základní pojmy a simulace pozice akustického zdroje

Tato kapitola se zabývá stručným popisem pojmů a skutečností, které jsou dále v textu zmiňovány.

### 1.1 Akustika

Akustika je věda o zvuku, jeho vzniku, šíření a vnímání. Uplatňuje se nejen v hudbě při výrobě hudebních nástrojů, důležitou roli hraje i ve stavebnictví. Tato práce se akustikou sice nezabývá, ale vzhledem k tomu, že pojednává o prostorových zvukových efektech, tak se částečně týká několika jejích podoborů.

- Fyzikální akustika – zabývá se vznikem a šířením zvukového vlnění, jeho odrazy a pohlcováním různými materiály.
- Hudební akustika – zabývá se zvukovým vlněním s důrazem na potřeby hudby.
- Elektroakustika – zabývá se možností záznamu, reprodukce, zesílení apod. zvukového vlnění pomocí elektrického proudu.

Dovolím si hned na začátek citovat učebnici ABC Hudební nauky [2], kterou napsal Prof. PaedDr. Luděk Zenkl, CSc., v níž je v souvislosti s akustikou obecně výstižně popsána i elektroakustika:

*... Akustika zkoumá též řeč, slyšení a vnímání hudby. Elektroakustika umožňuje zesilování hudby v nebývalé míře až na hranice únosnosti. Několik kytar s elektrickými zesilovači způsobí více hluku než velký orchestr. Proto akustika svými výzkumy poskytuje podklady a prostředky k boji proti nadměrné hlučnosti nejen v továrnách a na frekventovaných ulicích, ale i při koncertech a společenských zábavách. Do akustiky dále spadá propočítávání tónových soustav a soustav hudebního ladění a studium otázek konsonance a disonance. Dnes se skladatelé opírají o akustické poznatky více než v dřívějších dobách (například v otázkách instrumentace) a některé nejnovější skladebné směry dokonce z akustiky vycházejí, např. hudba elektronická. Akustiky hodně využívají též fonomatéři, zájemci o kvalitní hudební reprodukci na magnetofonech, gramofonech apod. V rámci všeobecné hudební nauky se nemůžeme s akustikou zabývat nijak podrobně, protože je to obor velmi široký a rozvětvený do řady samostatných podoborů s bohatou literaturou.*

## 1.2 Zvukové vlnění a jeho vlastnosti

Zvukové vlnění vzniká chvěním hmoty, kapaliny či plynu. Pro představu jde tedy například o chvění struny, proud tekoucí vody, chvění zvukového sloupce v píšťale apod. Místo, kde vzniká zvukové vlnění, se nazývá zvukový (akustický) zdroj zvuku. Zvukové vlnění se od zdroje šíří do všech směrů, jak popsal již fyzik Christian Huygens ve svém principu šíření vlnění. Jednoduchým důkazem může být fakt, že prasknutí balónku ve vzduchu je slyšet z kterékoli pozice v okolním prostoru. V tomto případě dochází k výbuchu, jenž způsobí tlakovou vlnu a ta v uchu rozechvěje ušní bubínek.

Vlnění může mít průběh pravidelný nebo nepravidelný. Nepravidelné vlnění nelze popsat pomocí periodické funkce, protože jeho průběh je náhodný. Toto vlnění označujeme jako tzv. hluk. Jedná se např. o tlesknutí, jiskření, v hudbě o zvuk bicích nástrojů apod. Pravidelné vlnění vnímá lidský sluch jako tón o určité výšce, délce a barvě. Jde o harmonické vlnění o určité frekvenci, které lze popsat periodickou funkcí sinus nebo kosinus. Nejjednodušší tón se skládá z jedné sinusovky.

V praxi se s tímto tónem běžně nesetkáme. Setkáme se hlavně s tóny složenými, které jsou tvořeny několika sinusoidami různých frekvencí neboli tóny částkovými, jež jsou uspořádány podle určitého pořádku. Tento pořádek se nazývá harmonická (aliquótní) řada. A první částkový tón určuje výšku tónu složeného, tzn. jde o jeho základní (fundamentální) frekvenci. Ve frekvenčním spektru má tento kmitočet největší zastoupení.

Alíkvótní řada je vyjádřena vždy jako pravidelná posloupnost intervalů: oktáva, kvinta, kvarta, velká tercie, malá tercie, velká sekunda a dále teoreticky až do nekonečna. Matematicky je popsána poměry frekvencí např. oktáva – 2:1, kvinta – 3:2 atd.

### 1.2.1 Charakteristika barvy zvuku

Každý hudební nástroj má svoji specifickou barvu a ta se odvíjí právě od uspořádání jednotlivých tónů alíkvótní řady. Barva je ovlivněna nejvíce samotnou stavbou hudebního nástroje. Pokud je účelem nástroje hrát v basovém rejstříku, jeho konstrukce je zpravidla větších rozměrů. U rejstříku sopránového je to přesně naopak. Tento princip zvětšování a zmenšování je nejlépe patrný na stavbě kostelních varhan. Klávesové nástroje jsou hlavně strunné. Varhany pracují na jiném principu. Tvorba tónu probíhá pomocí vhánění vzduchu do píšťal, kde dochází k resonanci vzduchového sloupce. Každá píšťala je speciálně zkonstruována pro danou základní frekvenci – pro hluboké frekvence je dlouhá a široká, pro vysoké krátká a úzká.

Barva tónu hudebních nástrojů závisí také na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, ať už jde o flétnu ze zlata nebo o ručně vyřezanou píšťalku z lískového dřeva. S tím souvisí odvěký hon hudebníků za dokonalou libozvučností (eufonií).

## 1.3 Simulace pozice zvukového zdroje

Lidský sluch je schopem zpracovávat zvukový materiál ve frekvenčním pásmu od 20 Hz do 20000 Hz. Rozlišuje výšku (frekvenci), hladinu intenzity zvuku a charakteristickou barvu. Spolu s těmito informacemi je schopen rozlišit také směr odkud příslušné akustické vlnění přijde. Tato komplexní informace člověku umožňuje vnímat prostor ve svém okolí, orientovat se v něm, lokalizovat zvukový zdroj apod.

Stejně jako oči jsou lidské uši párovým orgánem a člověk tudíž, pokud není nijak indisponován, přijímá sluchové vjemy oběma ušima. Mozek tyto vjemy zpracovává a dělá si obraz o prostoru, ve kterém se jedinec pohybuje. Lidské oči přijímají světelné vlnění a na základě porovnávání paprsků mozek vyhodnocuje, zda se pohybující se předmět přibližuje, vzdaluje, nebo následuje jinou trajektorii. Pokud člověk jedno oko nemá, přijímá vjemy pouze jedním senzorem a následný obraz postrádá třetí rozměr. Představa o vzdálenosti předmětu je zkreslena a schopnost určení jeho přesné polohy je ztížena. Obdobným způsobem dochází ke zkreslení informací u lidského sluchu. Tento jev lze snadno vyzkoušet zacpáním jednoho ušního otvoru vhodným izolačním materiálem – vatou, špunty do uší apod. Následná lokalizace zvukového zdroje je značně ztížena. Situace je podobná té, kdy se jednooký člověk pokusí řídit auto.

Zvukové vlnění se šíří do všech směrů. Dokážeme si tedy představit, jak probíhá detekce zvukového zdroje sluchovým ústrojím. Mějme soustavu člověk – akustický zdroj, mezi nimiž je určitá vzdálenost. Člověk vnímá zvukové vlny každým uchem zvlášť. K určení pozice zdroje porovnává hlasitosti jednotlivých příchozích vjemů. Pokud je vzdálenost akustického zdroje velká, vlnění, které daná osoba přijímá, má nízkou hlasitost. Z toho můžeme vyvodit závislost hladiny intenzity zvuku na vzdálenosti. Jedná se o nepřímou úměru, protože s menší vzdáleností se hladina intenzity zvuku zvyšuje. Analogicky probíhá identifikace pozice akustického zdroje v prostoru na levé či pravé straně. Pokud se akustický zdroj nachází například vlevo od posluchače, jsou zvukové vlny vnímány levým uchem dříve a hlasitěji než pravým.

Na tomto principu lze sestavit tzv. panorama efekt, kdy pomocí změny poměru hlasitostí levého a pravého zvukového kanálu docílíme změny pozice signálu. Tento efekt neobsahuje informace o vlastnostech prostředí, v němž se zvukový zdroj pohybuje. Výsledek neodpovídá reálnému pohybu zdroje v uzavřeném prostoru. Mnohem lepšího efektu simulace pohybu zvukového zdroje lze dosáhnout naměřením impulsních odezev v různých bodech možné trajektorie.

### 1.3.1 Impulsní odezva

Impulsní odezva označuje reakci dynamického systému na jednotkový impuls. V případě lineárního časově nezávislého systému tento systém odezva plně charak-

terizuje. Vybudíme-li systém vstupním signálem  $x$  posunutým v čase o  $t_0$ , systém odpoví odezvou  $y$  stejně zpožděnou o  $t_0$ . Impulsní odezva obsahuje informace o prostoru, prostředí, v němž se zvukové vlnění šíří a také příslušnou polohu zvukového zdroje vůči posluchači.

V oblasti zpracování zvukových signálů představuje důležitý koncept při tvorbě digitálních filtrů. Rozlišujeme systémy typu FIR a IIR. FIR (neboli finite impulse response) systémy reagují na jednotkový impuls signálem s konečným počtem vzorků. Systémy IIR mají nekonečně dlouhou impulsní odezvu. Tato práce se zabývá tvorbou filtru s konečnou impulsní odezvou (viz kapitola 3).

### 1.3.2 Prostorové rozložení ve stereofonním signálu

Problematika simulace pozice zvukového zdroje je úzce spjata s hudební praxí v nahrávacím studiu při určování finálního rozložení nástrojů v poslechovém spektru nahrávky. Hudba jako taková má, stejně jako matematické funkce, svoji horizontální a vertikální složku. Za horizontální složku považujeme melodii skladby, ta se mění s časem v závislosti na vertikální složce, tzv. harmonii. Harmonická složka naopak určuje, které tóny se mohou vyskytovat v melodii.

Jako názorný příklad mějme smyčcový kvartet ve složení dvě housle, viola a violoncello. Hudební skladatel, např. Wolfgang Amadeus Mozart, se rozhodne, že napíše skladbu pro náš soubor. Mozart použije ve své skladbě rozmanitých modulací z tóniny do tóniny a zároveň také vtipného kompozičního efektu předávání melodické linie mezi jednotlivými nástroji – první housle předají melodii violoncellu, to ji předá druhým houslím apod. Díky tomu se mění nejen barva ústřední linky, ale zároveň pozice v prostoru. Tušíme, že naše kvarteto na koncertě nesedí v řadě za sebou, resp. v jednom bodě. Barvy jednotlivých tónů nejlépe vyniknou, mají-li dostatečný prostor na to, aby se mohly pěkně rozvinout. Proto musí být dodržen určitý rozestup a zasedací pořádek hudebníků na pódiu.

Nyní si představme zvukaře v nahrávacím studiu, který vytváří nějakou hudební nahrávku. Jednotlivé stopy má zaznamenány v počítači bez jakéhokoliv prostorového uspořádání. Všechny stopy mají jako výchozí pozici nastavenou pozici centrální. Ve výsledné nahrávce tudíž znějí z jednoho místa. V souvislosti se vzájemnou korespondencí mezi harmonickou a melodickou složkou skladby dochází u tónů o stejné výšce

a různé barvě ke vzniku shluků a celkově je zvuk nahrávky nepřirozený a nečistý. Kdyby tímto způsobem byla reprodukována nahrávka Mozartova kvarteta, byl by autor značně nespokojen a posluchač přinejmenším nedostatečně obohacen o kulturní požitky. Cílem zvukové techniky je co nejlepší dojem při poslechu zvukové nahrávky. Ideální situace je ta, kdy posluchač je schopen v daném prostoru sluchem rozeznat jednotlivé nástroje. Existují dvě základní možnosti, jak tohoto stavu docílit.

Nejrychlejším a prakticky nejjednodušším způsobem je změna hodnoty parametru pro zesílení signálu v levém či pravém kanálu. Provedením tohoto úkonu pro každý nástroj dojde k akustickému rozšíření nahrávky. Barvy mají prostor na vyniknutí a pravděpodobnost případných kolizí při poslechu je menší. Tato metoda umožňuje tedy přibližně nastavit rozložení zvuku ve stereofonním signálu a změnou intenzity i vzdálenost. Intenzita zvuku však není jediným parametrem, který ovlivňuje posluchačův dojem o vzdálenosti akustického zdroje. Určení vzdálenosti v poslechovém spektru závisí na odrazu zvukových vln o stěny a různé další bariéry v místnosti. Bez přirozeného dozvuku je tak určení vzdálenosti neúplné. Použitím reverb efektu docílí zvukový technik požadovaného prostorového zvuku a hudební skladatel či posluchač by měli být s výsledkem spokojeni.

Dalším způsobem, který je sice komplikovanější, ale bližší realitě, je naměření impulsních odezev v jednotlivých bodech místnosti. O tomto způsobu podrobněji v kapitole 3. Konvolucí nahraných stop s odezvami v daných bodech dostaneme konkrétní a reálnou představu o prostoru.

# Kapitola 2

## Prostorové zvukové efekty

Za prostorové efekty považujeme ty, které ovlivňují vnímání zvuku z hlediska prostoru, ve kterém se daný signál může nacházet. Jde vlastně o simulaci reálného prostředí nebo naopak o zvláštní pokusy s přetvářením akustických vlastností prostředí, které již člověk důvěrně zná.

Prostorových efektů se hojně využívá v dnešní době například ve filmovém průmyslu, kdy se zvuková stopa mixuje do čtyř a více kanálů a díky rozmístění reproduktorů lze velmi kvalitně napodobit pohyb zvukového zdroje. Pokusy o kvadronní nahrávky na vinylové desky byly provozovány již v 70. letech 20. století v československém Supraphonu (viz [6]).

Cílem této bakalářské práce je zkonstruování efektu reverb na základě konvoluce signálu s impulsní odezvou, která je v každém bodě místnosti jiná. Díky této skutečnosti je možno nasimulovat pohyb akustického zdroje po určité trajektorii. Z reálného světa víme, že šíření zvuku v prostoru je částečně ovlivněno několika dalšími jevy, které mají na svědomí změnu vnímání celkového zvuku. Jsou jimi Dopplerův jev a efekt ozvěny.

- Dopplerův efekt – týká se změny vnímání frekvence pohybujícího se zvukového zdroje vůči posluchači. V případě pohybu zdroje směrem k posluchači dochází ke zhušťování zvukového vlnění a frekvence se jeví jako vyšší. Pokud se zdroj pohybuje směrem od posluchače, dochází analogicky ke zředění vlnění a frekvence se zdá nižší. Všeobecně známým příkladem Dopplerova jevu je jízda sanitky se zapnutou sirénou. Dalším příkladem využití je v hudbě tzv. Leslie reproduktor (viz [3]).

- Echo (Delay) efekt – umělá ozvěna je jev, kdy s určitým zpožděním slyšíme odraz reprodukováného zvuku.

Oba tyto efekty jsou prakticky obsaženy v naměřených impulsních odezvách. V jednotlivých bodech jsou naměřené signály vzájemně zpožděny. Toto zpoždění odpovídá době, za kterou zvukové vlnění urazí vzdálenost mezi zdrojem zvuku a posluchačem. Vzhledem k tomu, že tato vzdálenost je příliš krátká na to, aby lidský sluch zpoždění rozeznal, efekt ozvěny se neprojeví. Zpoždění by muselo být v řádu desítek milisekund. Reverb efekt je stejně jako echo složen ze zpožděných signálů. V případě echa jde ale pouze o simulaci odrazu zvukového vlnění o určitou překážku, nikoliv o odraz zvukových vln v celém prostoru, tím pádem o charakterizaci vlastností daného prostoru, jako je tomu u reverbu.

Stejně jako ozvěna se v našem efektu projevuje i Dopplerův jev. Rychlost pohybu zvukového zdroje a rozměry místnosti jsou příliš malé na to, aby se markantně projevil. Lidské ucho totiž není schopno rozeznat změnu frekvence při pomalém pohybu. Měřením impulsních odezev v jednotlivých bodech v prostoru však zároveň měříme fázové změny vlnění, na které je lidské ucho velmi citlivé. V důsledku těchto změn dochází k vnímání pohybu akustického zdroje.

## 2.1 Reverb

Reverb je zvukový efekt, který simuluje přirozený dozvuk místnosti. Vytváří tedy dojem určitého prostoru, uvnitř kterého se odrážejí zvukové vlny. Odraz zvukových vln v místnosti závisí na několika podstatných parametrech. Jedná se o:

- rozměry místnosti,
- prostředí, ve kterém se zvuk šíří,
- členění prostoru – zda je prostor ohraničen hladkými stěnami, stěnami tvarovanými, s izolací nebo např. protkán sloupy a jinými překážkami,
- materiál, ze kterého jsou stěny postaveny.

Díky odrazu zvukových vln je člověk schopen si udělat představu nejen o prostoru samotném, ale i o pozici zdroje zvukového vlnění, který se v daném prostoru může nacházet.



## 2.2 Význam přirozeného dozvuku

Církevní stavby jako kostely, katedrály apod. byly konstruovány již s úmyslem umocnit v návštěvníkovi dojem všeobjímající velikosti božské existence. V těchto prostorech lze slyšet ozvěnu zvukového vlnění. Robustní prostor umožňuje zajímavou a komplikovanou práci s hudebním materiálem. Vzhledem k dlouhému dozvuku je chrámová hudba odjakživa komponována s ohledem na samotnou stavbu. Varhanní skladby z tohoto prostoru dokonale těží, protože jejich zvuk se díky němu dlouho rozléhá a prostupuje nejen stavbou, ale hlavně posluchači. Hudba pro tyto účely by měla být srozumitelná. Harmonických změn je třeba využívat opatrně právě kvůli dlouhému dozvuku. Vzniklá disonance je sice efektem zvyšujícím hudební napětí, ale zároveň se může stát rušivým elementem.

Chrámová hudba byla komponována nejvíce v Evropě v období baroka (17. století). Vznikaly skladby pro různé církevní účely. Mše, requiem, oratorium, magnificat, litanie atd. Mezi nejznámější skladatele patřili např. Johann Sebastian Bach, Georg Friedrich Händel nebo také český skladatel Jan Dismas Zelenka, jehož tvorba byla objevena v druhé polovině 20. století v Německu.

Opačným extrémem ke kostelům, koncertním sálům a podobným prostorům může být obyčejné nahrávací studio. Tento prostor je postaven za účelem záznamu zvukového vlnění. Odrazy vlnění představují pro hudební nahrávku komplikace, protože snižují kvalitu a možnost dalších úprav pomocí zvukových efektů. Pocit hudební šířky a hloubky je člověku velice příjemný. Nahrávací studio je zkonstruováno tak, že izolační materiál po obvodu místnosti pohlcuje většinu zvukového vlnění, jehož odrazy by znehodnotily zvukovou nahrávku. Pro lidský sluch znamená šíření zvuku v tomto prostředí ztrátu určité zpětné vazby a díky tomu tento efekt vyvolává pocit stísnění a nejistoty. Sluchový dojem je suchý a nepřirozený. Muzikanti, kteří ve studiu nahrávají, si musejí určitou dobu zvykat na jiný zvuk svého nástroje. Barva zvuku nástroje je v tomto prostředí úplně jiná. Pokud se muzikant vzdá pocitu přirozeného dozvuku při nahrávání, je nakonec odměněn kvalitní nahrávkou, se kterou lze dále pracovat.

Přirozeného dozvuku jako součásti pořízené nahrávky se využívá při záznamech hudby v případě, že prostor je jedním z kompozičních článků skladby. Takovým typem je výše zmíněná chrámová hudba, při jejíž realizaci je prostor performance

pro samotného interpreta stěžejně důležitý. Tyto nahrávky však není vhodné dále dobarvovat různými efekty, protože by vznikly ruchy, různé shluky zvuků apod.

Z hlediska soudobé moderní hudby (jazz, rock, pop apod.) je prostor dotvářen až naposled. Zvukových efektů je díky záznamu ve studiu možno aplikovat velké množství. K dobarvování nahrávky se používá například phaser, distortion, chorus, simulace různých hudebních nástrojů a mnoho dalších.

Zvukovou nahrávku obohacujeme o přirozený dozvuk nejlépe až nakonec.

## 2.3 Různé způsoby simulace prostorového zvuku

V tomto oddíle je popsáno několik způsobů simulace prostorového zvuku. Nejprve je uveden pružinový reverb, který se využívá při živém provedení hudby. Dále jsou zmíněny některé digitální způsoby, včetně tzv. konvolučního reverbu (anglicky convolution reverb), který je založen na konvoluci signálu s předem nasnímanou impulsní odezvou místnosti, jejíž přirozený dozvuk chceme simulovat. U digitálního a konvolučního reverbu jde o různé způsoby, jak dosáhnout stejného výsledku simulace odrazu zvukových vln v určitém prostoru.

### 2.3.1 Pružinový reverb

Ve 40. letech 20. století jej uvedl na trh americký inženýr a vynálezce Laurens Hammond jako jeden z mnoha svých vynálezů. Laurens Hammond za svůj život vytvořil mnoho vylepšení v různých technických oblastech. Mezi nejznámější vynález patří jeho elektromechanické varhany z roku 1934, které nastartovaly etapu zavádění hudebních nástrojů obsahujících elektronické prvky do populární hudby.

Již na přelomu 19. a 20. století docházelo k pokusům o elektrifikaci akustických hudebních nástrojů. Šlo o potřebu člověka zesílit ty hudební nástroje, jež samy o sobě nehrají příliš hlasitě. V zásadě se takové nástroje dělí na elektromechanické a elektronické. V elektromechanických nástrojích dochází k tvorbě zvuku pomocí mechanických součástí. Do této skupiny lze zařadit nástroje nějakým způsobem elektrifikované přidáním snímače nebo mikrofону a nástroje tzv. elektrofonické, jež jsou konstruovány už od začátku s úmyslem provozu přes zesilovací systém. Zvuk v elektronických nástrojích není vytvářen mechanicky, nýbrž vzniká přímo v elektrických

obvodech. Více o historii těchto nástrojů viz [3].

Pružinový reverb začal Hammond přidávat do svých varhan a brzy se tento prvek začal používat i třeba v kytarových kombech, kde jej nalezneme dodnes. Konstrukce samotného efektu je vlastně velmi jednoduchá. Základem jsou kovové pružiny, jimiž prochází signál. Průchodem dojde ke zkreslení signálu, který je následně na druhém konci snímán a přenášen zesilovačem do reproduktoru. Tento typ reverbu je velmi charakteristický svým kovovým zabarvením. Při nárazu či vychýlení zesilovače nebo komba v době připojení k elektrické síti lze slyšet kmitání jednotlivých pružin.

### 2.3.2 Digitální reverb

U digitálního reverbu nedochází k žádné mechanické činnosti, která by vytvářela simulaci dozvuku. Přirozený dozvuk je složen z odrazů zvukových vln v daném prostoru. Digitálním reverbem se snažíme prakticky nasimulovat tyto odrazy. Existuje několik základních algoritmů, které takto upravují zvukový signál pomocí různého množství zpětnovazebních zpožďovacích obvodů.

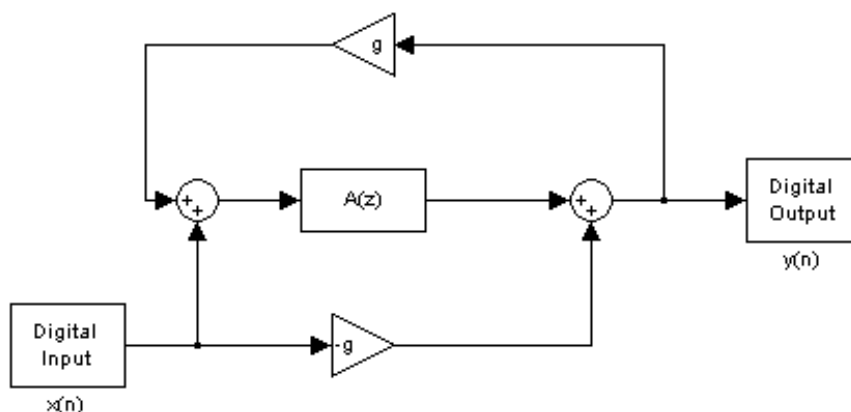
Myšlenku digitálního reverbu poprvé zformuloval na začátku 60. let 20. století vědec Bellových laboratoří Manfred Schroeder. Princip spočívá v použití rekurzivních hřebenových filtrů a zpožďovacího all-pass filtru. All-pass filtr je popsán rovnicí

$$y(n) = -g \cdot x(n) + x(n - m) + g \cdot y(n - m),$$

kde  $m$  je počet vzorků signálu, o který se má výstup opozdit. Tato konstrukce se stala brzy po svém uvedení standardní součástí umělých reverberátorů používaných dodnes. Použitím all-pass filtru nedochází ke změně zabarvení jednotlivých frekvencí. Tento předpoklad platí ale pouze pro zpožďovací smyčky délky kratší než 50 ms, tj. doba splnutí v lidském uchu. Potom dochází k značnému ovlivnění barvy zvuku.

V 70. letech 20. století upravil Michael Gerzon Schroederův efekt z jednoduchého filtru na soustavu filtrů, tedy soustavu paralelně zapojených all-pass filtrů. Základní myšlenkou této konstrukce je rostoucí spletnost impulsní odezvy bez většího frekvenčního zabarvení výsledného zvuku.

Na konci sedmdesátých let rozšířil američan Andy Moorer z firmy Sonic Solutions Schroederův efekt spojením jeho struktury s fyzikálním chováním skutečného prostoru. Zjistil, že nejdřívejší odrazy zvukových vln jsou velmi důležité z hlediska



Obrázek 2.1: Schéma all-pass filtru

vnímání velikosti a vlastností akustického prostoru a že tato vlastnost se dá použitím filtru s konečnou impulsní odezvou reprodukovat velmi důvěryhodně. Tento filtr se začleňuje do obvodu jako zpožďovací smyčka s jedním vstupem a jedním výstupem. V Moorerově struktuře tento výstupní signál prochází ještě sérií all-pass a hřebenových filtrů. Zesilovací prvek (u Schroedera gain  $g$ ) nahradil zpožďovací soustavou nízkopásmových propustí napodobujících pohlcení zvuku prostředím a ztrátové odrazy neboli pohlcování materiálem. [1]

Další používanou konstrukcí digitálního reverbu je Digital Waveguide Network (DWN), kterou navrhl Julius Smith v roce 1985. Slovem waveguide se rozumí obousměrná zpožďovací linka simulující průběh zvukové vlny v trubce či struně. Tato struktura je schopna věrohodně napodobit první odrazy zvukových vln a jejich rozptyl v prostoru. Pokud je síť doplněna o nízkopásmové propusti, je možno zkračovat nebo prodlužovat dobu rozpadu vln v prostoru, jinými slovy hloubku reverbu. DWN lze považovat za numericky stabilní filtr s dobrými vlastnostmi, jelikož je formálně rozdělen na část bezztrátového šíření signálu a část ztrátovou, kde určujeme požadovanou míru rozpadu zvuku.

### 2.3.3 Konvoluční reverb

K realizaci tohoto efektu je nutno mít předem připravenou impulsní odezvu konkrétního prostoru.

Ve spojitě oblasti vnímáme impulsní odezvu jako reakci na Diracův impuls, neboli nekonečně úzký a nekonečně vysoký impuls. V oblasti číslicových signálů

nahrazujeme Diracův impuls jednotkovým. Simulace takového signálu není vůbec jednoduchá, proto se používají spíše zvukové signály přibližující se průběhu tohoto impulsu. Aby bylo možno měřit impulsní odezvu alespoň trochu věrohodně, je potřeba vytvořit zvukový signál, který je pokaždé stejný. Nelze tedy použít například tleskání z toho důvodu, že člověk pravděpodobně není schopen tlesknout vždy se stejnou intenzitou i barvou zvuku. Pokud by se použil zvukový záznam tlesknutí, postrádalo by to také výpovědní hodnotu, protože taková nahrávka by už obsahovala přirozený dozvuk prostoru, v němž byla pořízena.

Vhodnějším podkladem pro záznam reakce prostoru na zvukový signál by mohl být např. výstřel z pistole, který lze považovat za stejný při každém jeho opakování. Profesionálně se ale používá zvuk elektrického výboje, tedy elektrické jiskření. V porovnání s výstřelem z pistole určitě obsahuje jiskření méně zkreslení a možných nasnímaných mechanických úkonů (tím je míněn mechanický systém pistole) při samotném provádění měření.

Princip měření impulsní odezvy, jež byl použit při našem měření, je znázorněn na obrázku 3.1, kde je ze signálového generátoru reprodukován signál. Tento signál je snímán jedním mikrofonom přímo u reproduktoru a dvěma mikrofony současně v konkrétním bodě daného prostoru.

# Kapitola 3

## Měření impulsní odezvy

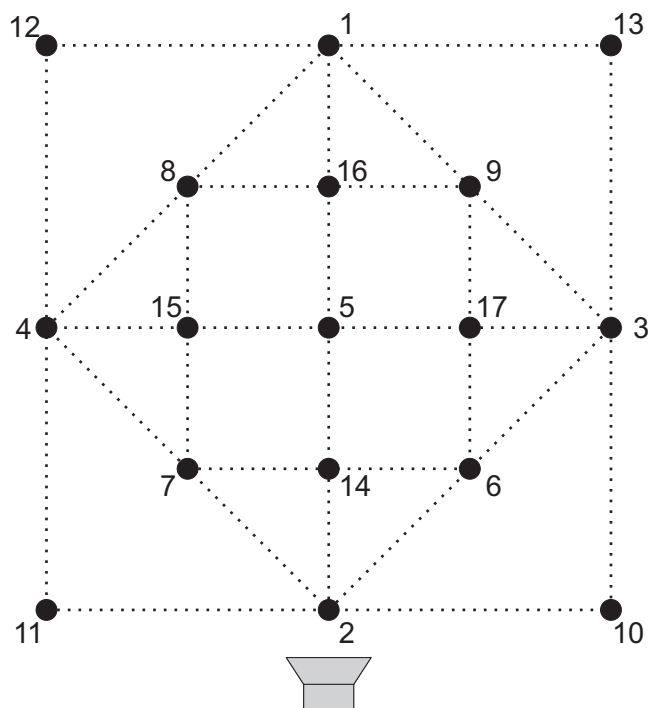
Základním předpokladem pro dosažení hmatatelného výstupu této bakalářské práce bylo naměření impulsních odezev v určitém prostoru. Experiment spočíval v měření impulsní odezvy v předem zvolených bodech za účelem následné simulace pozice zvukového zdroje vůči posluchači, resp. pozice posluchače vůči zdroji. Měření proběhlo celkem ve třech místnostech.

První měření bylo realizováno jako předběžný pokus, jehož cílem bylo získat podklad pro vytvoření základního algoritmu. Pro měření byla zvolena síť bodů v rovině před reproduktorem, která byla uspořádána tak, aby jednotlivé trajektorie procházely danými body. K pokusu byla vybrána místnost v budově B areálu TUL, v níž byl vymezen prostor o rozměrech  $1,5 \times 1,5$  m.

Síť obsahovala 17 bodů, rozmístěných v rovině před reproduktorem (viz obr. 3.1). Tímto uspořádáním bylo možno vhodně proložit trasu pro pohyb zleva doprava, od posluchače a zpět, případně čtvercovou trajektorii. Všechny ostatní byly naměřeny až při druhém pokusu. Pro síť z prvního měření jsou simulované geometrické útvary přizpůsobeny počtu bodů, takže nejsou úplně přesné. Vzhledem k této skutečnosti se vlastně jedná o malé oklamání posluchače, avšak ve výsledku není rozdíl příliš markantní.

### 3.1 Funkce jednotlivých mikrofonů

Experiment byl založen na již výše zmíněném principu snímání prostorově zkresleného zvuku. V bezprostřední blízkosti zvukového zdroje byl postaven mikrofon



Obrázek 3.1: Sít' 17 bodů před reproduktorem

zaznamenávající signál vycházející z reproduktoru. Do jednotlivých bodů v rovině byly postaveny dva směrové mikrofony zastupující posluchačovy uši. Ty snímaly signál, který v daném prostředí v určitém místě doputuje k posluchači. Porovnáním původního signálu a toho, který je měřený mikrofonom, je možno určit impulsní odezvu.

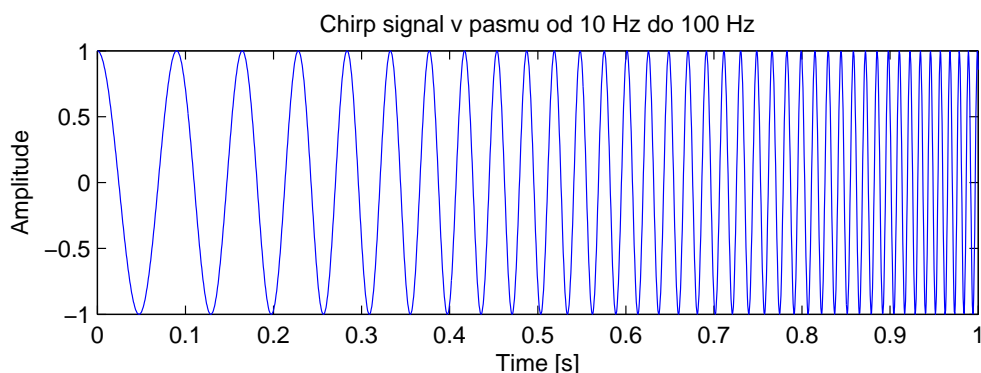
Kdybychom měřili pouze jedním mikrofonom, požadovaný efekt by nebyl stereofonní a nemohli bychom tak určit polohu zvukového zdroje v prostoru.

## 3.2 Volba podkladového materiálu

Ideálním podkladem pro měření impulsní odezvy by byl Diracův impuls. Ten nelze reálně zkonstruovat, protože obsahuje všechny frekvence. V prostředí programu Matlab existuje příkaz `gauspuls`, který je schopen vygenerovat impuls přibližující se podobě Diracova impulsu, který je frekvenčně omezen. Tento signál je ale v našich podmínkách prakticky nepoužitelný, protože měření s ním je značně nepřesné.

Existují různé způsoby měření impulsní odezvy (viz [8]). Jedním z nich je tzv. Logarithmic SineSweep technique. Tento způsob využívá k měření impulsní odezvy signál, jehož frekvence (v určitém předem zvoleném rozsahu) exponenciálně s časem

roste. V Matlabu lze tento signál vygenerovat pomocí příkazu `chirp`, kde definujeme počáteční a konečnou frekvenci a délku signálu. Pro tento experiment jsme zvolili parametry frekvencí od 20 Hz do 8000 Hz (představuje polovinu vzorkovací frekvence) a dobu trvání 1 s. S přehráváním tohoto signálu nenastaly žádné problémy. V průběhu realizace druhého pokusu o měření impulsní odezvy však bylo zjištěno, že také není úplně vhodný.



Obrázek 3.2: Ukázka průběhu signálu chirp

U některých naměřených impulsních odezev docházelo k resonanci vysokých frekvencí, které se projevovalo nepříjemným „cinkáním“ během přehrávání zpracovaného signálu. Bohužel při pokusu nebylo zjištěno, co přesně tento jev způsobovalo. Nelze přesně určit, zda bylo resonování zapříčiněno charakteristikou přehrávací aparatury nebo orientací mikrofónů vůči ní. Problém byl vyřešen použitím jiného signálu. Impulsní odezvu totiž lze vypočítat teoreticky z jakéhokoli signálu, takže jako referenční signál byl zvolen úsek zvukové nahrávky o délce 2 s, obsahující pouze mluvené slovo bez přirozeného dozvuku. Frekvenční pásmo se takto značně zmenšilo a resonance vysokých kmitočtů byla potlačena.



## 3.3 Problematika měření impulsní odezvy

Celkově je samotné měření impulsní odezvy velmi náročné na vybavení a na provedení. Jakékoliv narušení z vnějšího prostředí znehodnocuje záznamy. Mikrofony jsou velmi citlivé, takže zaznamenají i větrák chladicí notebook, kliknutí myši a do jisté míry i hluk z vně místnosti.

Výsledek je vždy zkreslený, protože zároveň s měřením impulsní odezvy měříme i charakteristiku použité aparatury. Reproduktor by měl být studiové kvality s co nejmenším zkreslením zvuku při přehrávání. Mikrofony by měly mít stejnou citlivost a kabely by měly přenášet informace stejně kvalitně. Zkreslení dat může způsobit i interní zvuková karta, díky níž se do záznamu může přenášet i rušení vzniklé činností částí počítače. Proto je vhodné použít kartu externí.

Mikrofony musí směřovat vždy kolmo k rovině reproduktoru. Důležité je také vnímání levého a pravého kanálu. Mikrofon, který se z pohledu reproduktoru nachází vlevo, zastupuje pravé ucho a pravý mikrofon zase ucho levé. Je to z toho důvodu, že při experimentu dochází k pohybu posluchače. Následná simulace probíhá ze strany pohybujícího se zvukového zdroje.

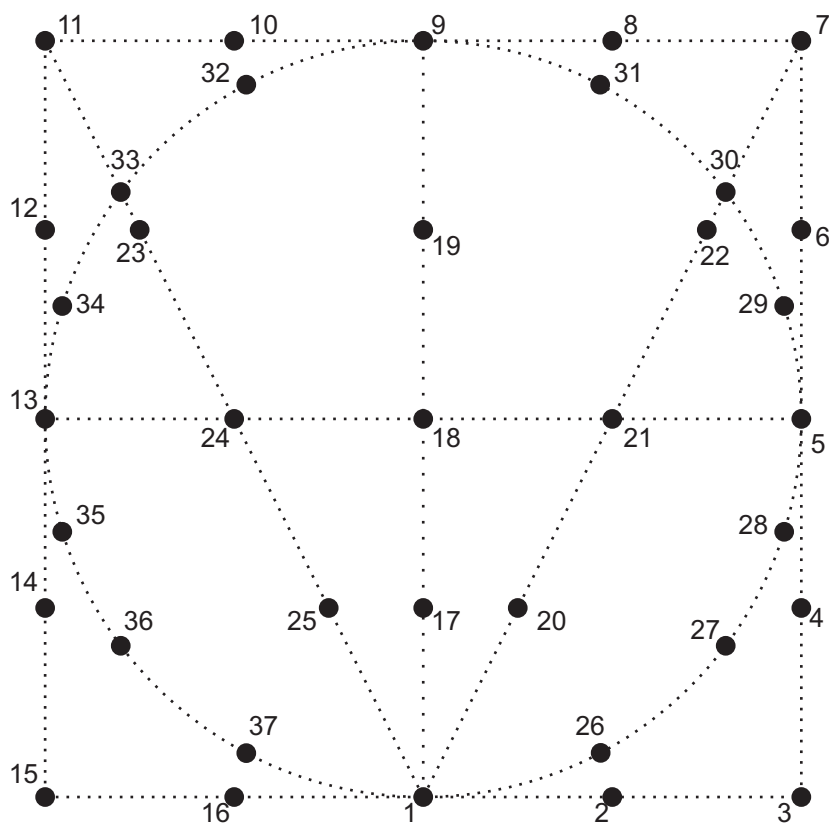
### 3.3.1 Vybavení

K experimentu bylo využito následné vybavení:

- externí zvuková karta Presonus Firestudio Mobile,
- trojice směrových mikrofonů značky Rode model NT55,
- software pro práci se zvukovými soubory Steinberg Cubase 5,
- reproduktor Genius – první měření,
- klávesové kombo Roland KC-150 – druhé a třetí měření.

Pro druhé měření byl zvolen prostor větší. Síť o 37 bodech o rozměrech  $3 \times 3$  m byla rozmístěna v autorově obývacím pokoji. Početnější množina umožnila simulovat složitější trajektorie (trojúhelníková a kruhová), které nebylo možno dostatečně přesně realizovat v rámci prvního pokusu.

Třetí měření bylo provedeno v prostoru koupelny, která svými malými rozměry neumožňovala simulovat žádné trajektorie. Koupelna je však velmi specifická místnost. Je všeobecně známo, že si lidé rádi v koupelně zpívají, protože se v ní zvukové vlny dobře odrážejí a fakt, že mohou zpívat falešně, je tak potlačen.



Obrázek 3.3: Síť bodů -  $3 \times 3$  m

### 3.4 Průběh experimentu a zpracování dat

V programu Cubase, umožňujícím práci se zvukovými soubory, byly současně zaznamenávány jednotlivé signály ze všech mikrofónů. Z každého místa v síti bodů byly tedy získány tři WAV soubory, které byly následně zpracovávány v Matlabu.

Nechť  $g$  je signál, který nasnímáme mikrofónem u reproduktoru a  $g'$  je signál, který dorazí k posluchači a jeho hodnota odpovídá vztahu  $g' = g * h$ , kde  $h$  je impulsní odezva systému. Proměnná  $h$  je neznámou, kterou je potřeba určit. Vznikne nám tedy soustava rovnic, kde počet neznámých je roven délce impulsní odezvy.

Pořízené nahrávky zvuku, procházejícího prostředím místnosti, byly upraveny na stejnou délku a přiřazeny ke konkrétním bodům místnosti, kde byly zazna-

menány. V prostředí Matlab byly nahrávky zpracovány postupem uvedeným v kódu `odezva.m` (A.1). WAV soubory byly zaznamenány při vzorkovací frekvenci 44100 Hz, takže výpočet impulsní odezvy byl, kvůli velké výpočetní náročnosti, velmi zdoluhavý. Převzorkováním dat na frekvence 16000 Hz bylo dosaženo značného zrychlení a zároveň větší stability aplikace. V praxi bylo vyzkoušeno, že neprovedením převzorkování může při spuštění algoritmu dojít k přetížení počítače a výpadku systému. Jinou možností je použití složitější implementace řešení systému rovnic, který je rychlejší a není tak náročný na paměť – např. Levinson–Durbinův algoritmus ([7]).

Pro účel vytvoření dojmu určitého prostorového pohybu bylo potřeba seřadit impulsní odezvy, patřící k jednotlivým bodům, do pole. Z hlediska velké výpočetní náročnosti skriptu `odezva` (A.1), ve kterém se spouští `mmse.m` (A.2) pro výpočet odezvy nasnímané levým resp. pravým mikrofonom, bylo nutno počítat impulsní odezvu v jednotlivých bodech postupně. Pro všechny tři pokusy byly vytvořeny soubory ve formátu MAT, ve kterých byly uloženy impulsní odezvy příslušné k měřeným bodům v pořadí uvedeném na obr. 3.1 či 3.3. Toto řazení umožňuje jednoduché sestavení bodů do požadované trajektorie zvukového zdroje.

### 3.4.1 Výpočet impulsní odezvy

Jak již bylo zmíněno výše, zvukový signál putující od zdroje k přijímači, prochází určitým prostředím, v našem případě vzduchem, a dojde zkreslený. Zkreslením rozumíme soubor činitelů ovlivňujících zvukové vlnění při jeho pohybu. Jsou to srážky zvukových vln s částicemi plynu nebo kapaliny. Dále proudění vln jiným prostředím jako např. kovovou trubicí, dřevěným ozvučníkem kytary apod. Při průchodu zvukových vln prostředím dochází k odrazům o různé bariéry a stěny ohraničující prostor. Všechny tyto informace jsou obsaženy v impulsní odezvě daného akustického systému.

Naším cílem tedy je najít optimální filtr  $h[k]$  délky  $L$ , kde  $k = 0, \dots, L-1$ , kterým zpracujeme referenční signál  $x[n]$  (mikrofon u reproduktoru) tak, aby výsledný signál

$$y[n] = h[0]x[n] + h[1]x[n-1] + \dots + h[L-1]x[n-L] = \sum_{k=0}^{L-1} h[k]x[n-k]$$

byl co nejbližší, ideálně roven, očekávanému signálu  $d[n]$  (mikrofon zastupující ucho).

Definujme  $e[n] = d[n] - y[n]$ , jako chybu v čase  $n$ .

Zavedeme-li vektory

$$\mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} x[n] \\ x[n-1] \\ \vdots \\ x[n-L] \end{bmatrix} \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} h[0] \\ h[1] \\ \vdots \\ h[L] \end{bmatrix},$$

vektorově můžeme vztah zapsat pomocí maticového součinu  $y[n] = \mathbf{h}^T \mathbf{x}_n$ .

Impulsní odezvu určíme na základě minimálního středního kvadratického kritéria, tzn. budeme minimalizovat druhou mocninu  $e[n]$ . Zavedeme funkci  $J_n(\mathbf{h})$ .

Minimalizujeme tuto hodnotu na časovém intervalu  $n = n_1, \dots, n_2$ . Budeme-li uvažovat hodnoty  $n_1 = 1$  a  $n_2 = N$ , pak můžeme kritérium zapsat jako

$$J(\mathbf{h}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e[n]^2.$$

Derivace je lineární operace, takže gradient  $J(\mathbf{h})$  je roven průměru gradientů  $J_n(\mathbf{h})$  a platí

$$\Delta J(\mathbf{h}) = -2\mathbf{p} + 2\mathbf{R}\mathbf{h},$$

kde

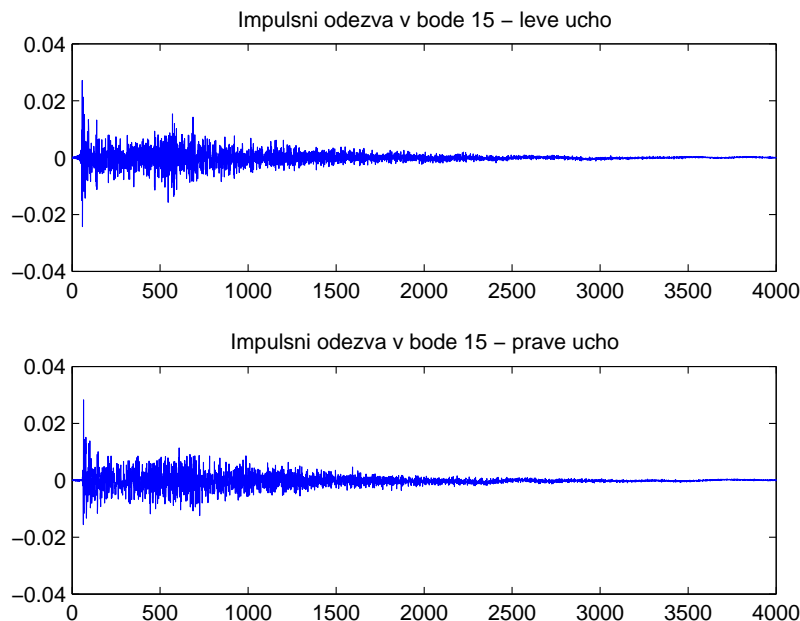
$$\mathbf{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_n \mathbf{x}_n^T, \quad \mathbf{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_n d[n].$$

Minimum kritéria nalezneme, položíme-li derivaci rovnu nule, tj. gradient je roven nule, tudíž

$$\mathbf{h} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}.$$

Nyní je patrné, proč je určování impulsní odezvy tak výpočetně náročné. Matice  $\mathbf{R}$  má rozměry o velikosti  $L \times L$ , je symetrická a toeplitzovská. Tato matice je diagonálně konstantní a k jejímu popisu stačí pouze jeden řádek matice (viz [9]). Operace inverze vyžaduje  $L^3$  operací a zápis do paměti  $L^2$ . Je-li  $L = 4000$ , zabere inverze  $4000^3 + 4000^2 = 6,4016 \cdot 10^{10}$  operací.

Na obrázku 3.4 je znázorněn rozdíl mezi impulsními odezvami pro levé a pravé ucho v jednom bodě. Jedná se o počáteční bod trajektorie zleva doprava. Impulsní odezva pro levé ucho je hlasitější než pro pravé, což by mělo odpovídat skutečnosti. Pokud se zvukový zdroj nachází vlevo od posluchače, levé ucho vnímá zvukové vlnění silněji než pravé.



Obrázek 3.4: Ukázka průběhu impulsní odezvy

Odezvy jsou zpožděny o 65 vzorků, což odpovídá času 4,1 ms při vzorkovací frekvenci 16000 Hz. Z toho vyplývá, že vzdálenost mezi reproduktorem a mikrofonem je přibližně 1,42 m (rychlost zvuku  $c = 346,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  při teplotě  $\tau = 25^\circ\text{C}$ ).

### 3.5 Konvoluce

Mějme diskrétní signály  $x$  o délce  $N_x$  a  $h$  o délce  $N_h$ . Matematickou operaci konvoluci můžeme definovat jako

$$x * h = \sum_i x_i \cdot h_{m-i}, i = 0, \dots, m.$$

Výsledný signál má délku (resp. obecně počet nenulových prvků)  $N = N_x + N_h$ . Jinými slovy, původní signál je prodloužen o reakci na impulsní odezvu. Tímto způsobem lze tedy vytvořit filtr, který pomocí konvoluce signálu a spočtené impulsní odezvy v daném bodě vytvoří zkrácený signál, který zní jako by se v tom bodě nacházel. Operace konvoluce je početně náročná. Během výpočtu totiž algoritmus po prvcích vynásobí signál s impulsní odezvou. Složitost tohoto algoritmu je tedy  $\mathcal{O}(N_x^2)$ .

Z vlastností konvoluce je známo, že platí

$$y[n] = x[n] * h[n]$$

pak Fourierova transformace je

$$Y[k] = X[k] \cdot H[k],$$

protože platí  $\mathcal{F}(f * g) = \mathcal{F}(f) \cdot \mathcal{F}(g)$ . Aplikací diskrétní Fourierovy transformace (DFT) resp. rychlého algoritmu pro její výpočet (FFT) zjednodušíme problém na složitost řádu  $\mathcal{O}(N \cdot \log N)$ . DFT převádí součin ve frekvenční oblasti na kruhovou konvoluci, která existuje pouze za podmínky, že oba signály mají shodnou délku. Signály ovšem stejně dlouhé nejsou.

V praxi máme k dispozici signál, který je mnohonásobně delší než impulsní odezva. Prodloužením signálů na stejnou délku by rapidně narostl počet operací. Tento způsob není výhodný z hlediska plynulosti a rychlosti programu. Proto můžeme využít tzv. overlap-add algoritmu, který je popsán v následující sekci.

### 3.6 Overlap-add algoritmus

Rozdělením signálu  $x$  do bloků se výpočet konvoluce radikálně zrychlí díky snížení počtu operací. Konvoluci provedeme na základě tzv. Overlap-add algoritmu, jehož principem je zmíněné rozdělení problému na několik menších. V podstatě je možné takto počítat konvoluci nekonečně dlouhého signálu s krátkou impulsní odezvou.

Signál  $x$  rozdělíme na segmenty  $x_i$  délky  $N_x$ . Impulsní odezvu  $h$  délky  $N_y$  a  $i$ -tý segment signálu  $x$  prodloužíme o nuly na shodnou délku  $N = N_x + N_y - 1$ . Vypočítáme kruhovou konvoluci pomocí FFT. Tímto způsobem provedeme pro další segmenty až do konce signálu. V algoritmu dochází k překryvu jednotlivých bloků. Postupně tyto překryvy přičítáme k předchozím, čímž dostaneme požadovanou konvoluci – proto název Overlap-add konvoluce.

Naprogramovaná aplikace využívá metody Overlap-add k rychlému výpočtu konvoluce pro všechny body trajektorie během jednoho cyklu (viz A.3). Tento koncept je efektivní, protože konvoluce a FFT jsou lineární a data tak můžeme napočítat dopředu a vše smíchat dle potřeby až nakonec. Nezáleží totiž na jejich pořadí.

### 3.6.1 Využití linearity konvoluce a FFT

Uvažujme případ pohybu zvukového zdroje pouze mezi dvěma body, jejichž pozice v prostoru jsou definovány impulsními odezvami  $h_1(t)$  a  $h_2(t)$ . Mějme signál  $s(t)$  a koeficient  $\lambda$ , který zastupuje normalizovanou pozici zvukového zdroje na trajektorii a nabývá hodnot mezi 0 a 1. Na základě jeho hodnoty určíme poměr, kterým vynásobíme signál  $s(t)$ . Výsledný signál se potom pohybuje mezi dvěma porovnávanými body.

Platí tedy, že:

$$x(t) = \lambda \cdot h_1(t) * s(t) + (1 - \lambda) \cdot h_2(t) * s(t)$$

$$x(t) = (\lambda \cdot h_1(t) + (1 - \lambda) \cdot h_2(t)) * s(t)$$

Z vlastností Fourierovy transformace platí, že:

$$X(\Theta) = (\lambda \cdot H_1(\Theta) + (1 - \lambda) \cdot H_2(\Theta)) \cdot S(\Theta)$$

$$X(\Theta) = \lambda \cdot \underbrace{H_1(\Theta) \cdot S(\Theta)}_{\swarrow} + (1 - \lambda) \cdot \underbrace{H_2(\Theta) \cdot S(\Theta)}_{\swarrow}$$

můžeme spočítat dopředu

$\Rightarrow$  konvoluci signálu s impulsními odezvami v obou bodech můžeme spočítat paralelně a mixovat přes  $\lambda$  až potom. Tento přístup se vyplácí v případě, že máme trajektorii složenou z více bodů.

## 3.7 Prostorová a časová mapa

Na základě výše uvedeného principu jsou data připravena k výslednému mixování do výstupu. Máme-li rozhodovat o pozici akustického zdroje na trajektorii složené z více bodů, nastává problém. Pomocí výše zmíněného způsobu jsme schopni určit pozici pouze mezi dvěma body. Pro větší množství bodů je vhodné si zvolit tzv. mapu prostoru a časovou mapu.

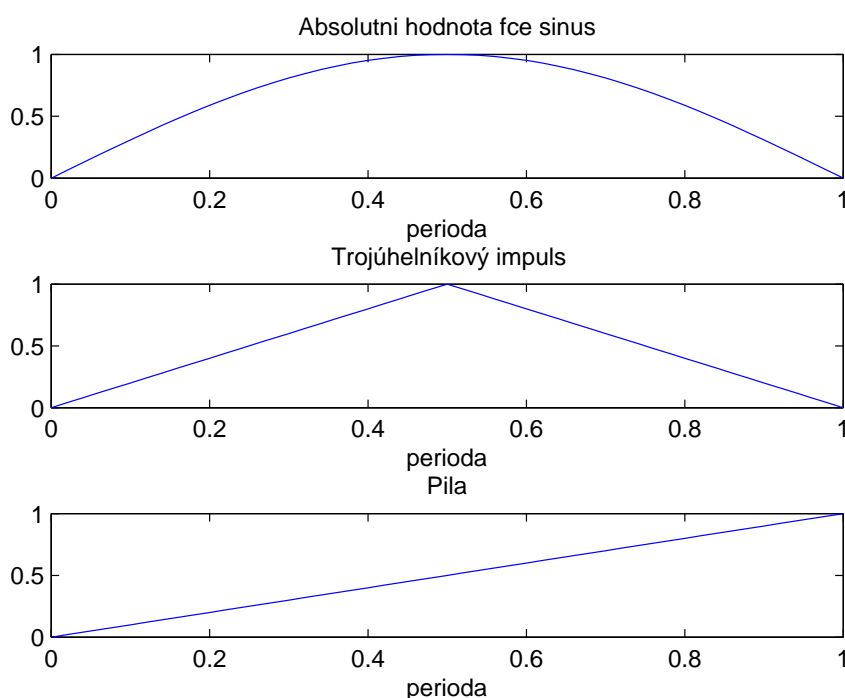
### 3.7.1 Časová mapa

Pro potřeby správné simulace pohybu po trajektorii je nutno rozlišovat dva typy pohybů. První probíhá po úsečce (například zleva doprava, přibližování se a vzda-

lování) a druhá po složitějším útvaru (trojúhelník, čtverec či kružnice). Oba mají společný fakt, že počáteční bod má hodnotu 0 a konečný 1.

Pokud uvažujeme pohyb po úsečce, počáteční a konečný bod jsou definovány jako okrajové body úsečky. Geometrické útvary jsou uzavřené, tudíž pohyb zvukového zdroje končí ve stejném bodě, ve kterém začal. První bod tedy musíme započítat do trajektorie dvakrát. Ten samý bod má na začátku hodnotu 0 a na konci hodnotu 1.

Požadavkem na efekt simulace pohybu zdroje v prostoru je pohyb, který se po dobu trvání signálu stále opakuje. Hledáme tedy periodickou funkci, jejíž obor hodnot  $H(f) = \langle 0, 1 \rangle$  a definiční obor  $D(f) = \mathbb{R}$ , který je však omezen v našem případě počtem vzorků zpracovávaného signálu. Požadovanými funkcemi mohou být například funkce uvedené na obrázku 3.5.



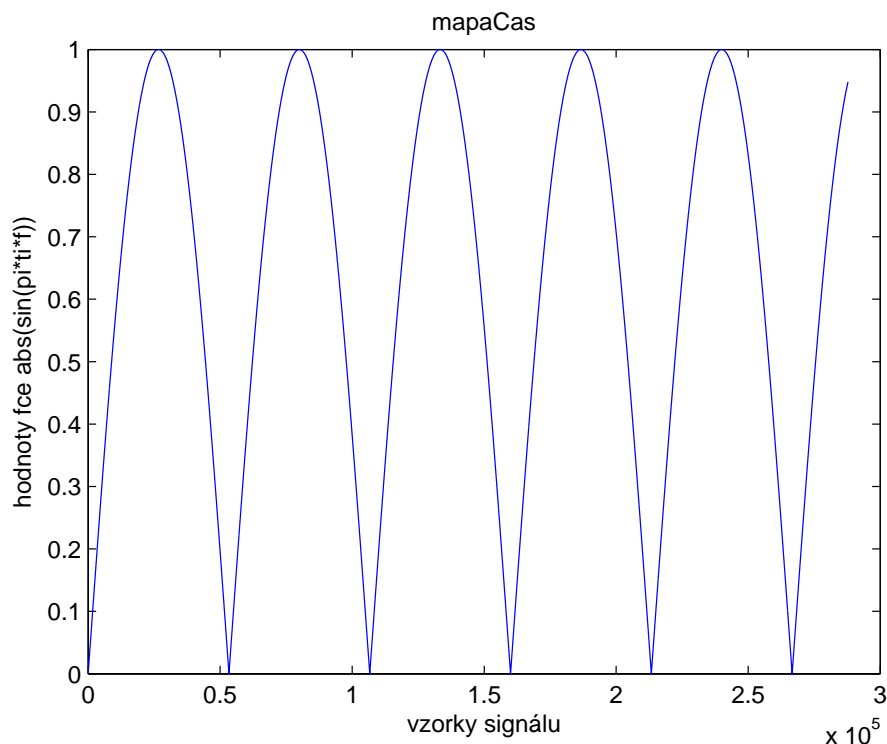
Obrázek 3.5: Časové funkce

Pro pohyb po úsečce jsou vhodné funkce sinus a trojúhelníkový impuls. Pro složitější trajektorie je lepší pila neboli tzv. rampa.

Výsledná časová mapa při použití funkce sinus je znázorněna na obrázku 3.6.

Funkční hodnoty časové funkce použijeme jako řídicí prvek pro určování hodnot v mapě prostoru. Frekvenci, s níž se pozice zvukového zdroje mění, vyjadřuje proměnná  $f$ , kterou je možno upravovat ve finální aplikaci.





Obrázek 3.6: Hodnoty proměnné mapaCas závislé na funkci sinus

### 3.7.2 Prostorová mapa

Výše zmíněný koeficient  $\lambda$  je potřeba vnímat jako váhu impulsní odezvy prostoru v bodě trajektorie, ve kterém se v daném okamžiku zvukový zdroj nachází. Váha jeho impulsní odezvy je maximální, tzn. rovna 1. Pro ostatní body trajektorie platí ve stejném okamžiku, že mají váhu 0. Nyní potřebujeme nasimulovat pohyb i mezi jednotlivými body. K tomu je vhodné použít interpolaci impulsních odezev.

Interpolace označuje křivku, která umožňuje určit hodnotu funkce v intervalech mezi sousedními body trajektorie. Interpolaci můžeme provádět lineárně, kvadraticky nebo polynomem vyššího stupně. Vzhledem k velkému počtu bodů potřebujeme provést interpolaci polynomem vyššího stupně. V Matlabu existuje příkaz `pchip`, který umožňuje interpolaci spočítat. Její výpočet je poměrně rychlý, protože probíhá po částech prokládáním bodů Hermitovými polynomy 3. řádu.

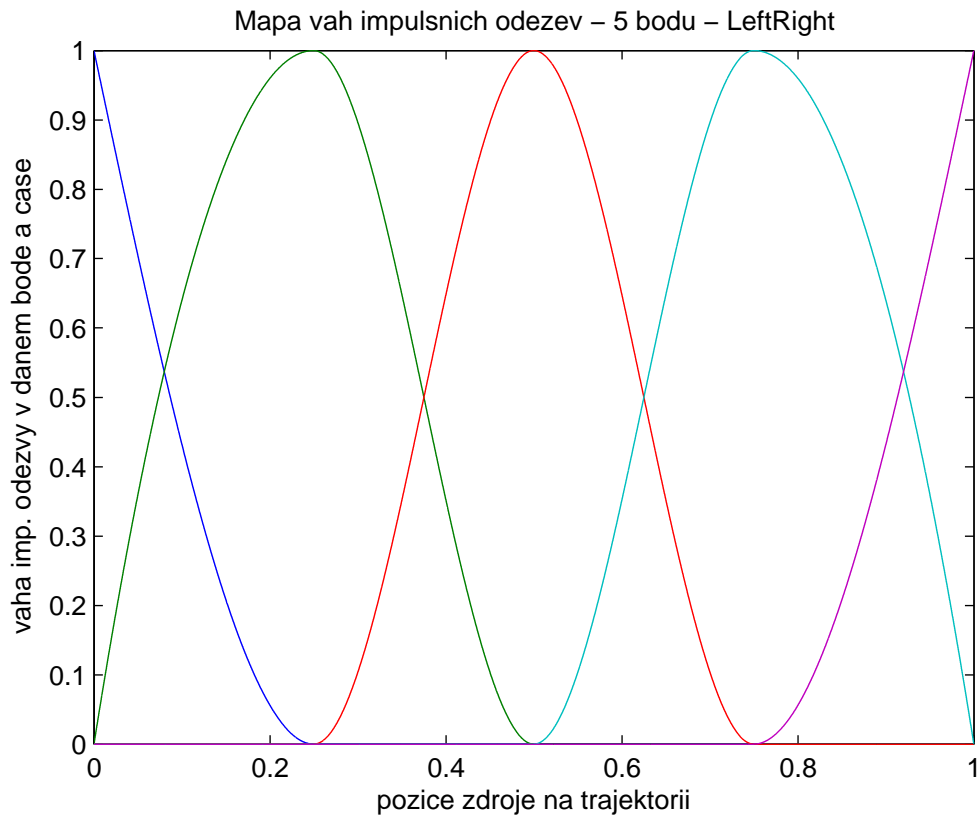
Od mapy prostoru vyžadujeme, aby hodnoty na ose  $x$  odpovídaly funkčním hodnotám časové funkce. Jedná se tedy o normalizovanou polohu zvukového zdroje na trajektorii.

Pro  $n$  bodů spočítáme  $n$  interpolačních křivek, takových, že pro každý bod tra-

jektorie budeme mít příslušnou křivku, splňující požadované váhové kritérium.

Váhové kritérium je takové, že v daném bodě je váha 1 a v ostatních 0. Jedničky a nuly jsou pro každý bod vždy posunuty o jednu pozici vpravo. Postupně pro  $n$  bodů dostaneme čtvercovou matici s jedničkami na diagonále a nulami na ostatních pozicích (viz níže). Je zřejmé, že se jedná o jednotkovou matici o rozměrech  $n \times n$ . Chceme-li spočítat křivky pro všechny body, můžeme tak učinit v rámci jednoho cyklu, který načte z matice **yfeed**, která se mění v závislosti na počtu bodů, hodnoty po řádcích.

$$\mathbf{yfeed} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Obrázek 3.7: Hodnoty proměnné **yPchip** pro 5 bodů

Na obr. 3.7 jsou znázorněny interpolační křivky pro každý bod. Je vidět, že nenulové hodnoty leží vždy mezi dvěma sousedními body. Všechny ostatní jsou v daném okamžiku nulové.

Funkční hodnota časové funkce určuje hodnotu na ose  $x$  na mapě prostoru a funkční hodnota na mapě prostoru následně představuje hledanou váhu. Pro  $n$  bodů tak dostaneme  $n$  vah, kterými postupně vynásobíme výsledky overlap-add konvoluce a vytvoříme tak konečnou podobu prostorového efektu.

Použití interpolace je v rámci efektového algoritmu velmi výhodné, protože časovou funkci `mapaCas` a matici polynomů `yPchip` je možno spočítat odděleně, tudíž její časová náročnost je velice malá.

# Kapitola 4

## Aplikace Stereopanner Universal

Pro finální aplikaci spojující všechny typy trajektorií a naměřených prostorů byl zvolen sjednocující název Stereopanner Universal.

Aplikace je navržena tak, aby byla co nejjednodušší a aby uživatel mohl rychle měnit parametry efektu. Mezi parametry, které lze měnit, patří:

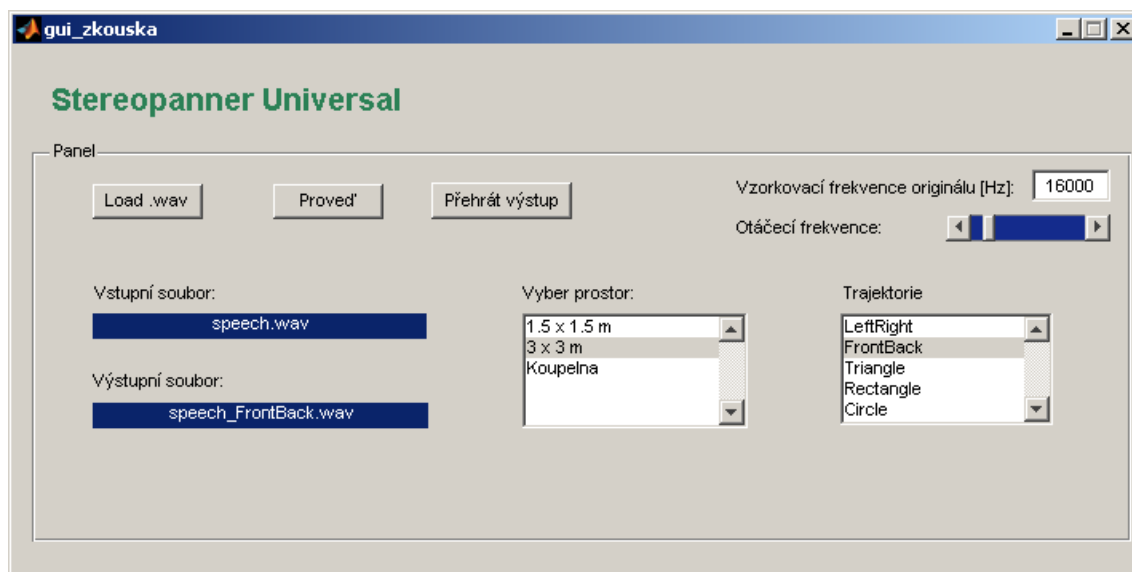
- otáčecí frekvence, resp. rychlost pohybu zvukového zdroje,
- trajektorie, po níž se zdroj pohybuje,
- prostor, v němž se zdroj pohybuje.

Program rozlišuje, zda zdrojový soubor ve formátu WAV je monofonní nebo stereofonní. V případě, že je monofonní, výsledek je převeden do sterea tím, že mono stopa je zkopírována do obou kanálů a konvoluce je spočtena s levým a pravým kanálem úplně stejně, jako by nahrávka byla stereofonní.

### 4.1 Matlab GUI

Finální aplikace je založena na spojení všech naprogramovaných algoritmů pro výpočet efektu pro všechny trajektorie a typy prostorů. Byla naprogramována za účelem jednoduchého a názorného využití možností jednotlivých parametrů efektu.

Ovládací panel aplikace obsahuje tři tlačítka – **Load .wav**, **Proved'** a **Přehrát výstup**. Stisknutím tlačítka **Load .wav** se otevře okno, kde si uživatel vybere zvukový soubor ve formátu WAV. Tlačítkem **Proved'** lze spustit algoritmus efektu na



Obrázek 4.1: Obrazovka aplikace Stereopanner Universal

základě předem vybraných parametrů z nabídky **Vyber prostor** a **Trajektorie**. Lze měnit i frekvenci pohybu po trajektorii pomocí scrollbaru **Otáčecí frekvence**.

Výběrem trajektorie se prakticky určí, který M-file bude spuštěn. Na základě indexu položky v listboxu **Trajektorie** se spustí konkrétní soubor. Konkrétní prostory vstupují do funkcí jako parametry a jejich rozlišení je řízeno cyklem **switchcase**.

Po provedení algoritmu je výsledek zapsán do souboru, jehož název je složen z původního názvu a připojeného názvu dané trajektorie.

Aplikace Stereopanner Universal je k dispozici na přiloženém CD jako M-file s názvem `gui_zkouska.m`, takže ji lze spustit pouze v prostředí Matlab. Doporučuji celou složku, v níž je aplikace nahrána, zkopírovat do počítače. Práce s WAV soubory probíhá ve složce, kde je umístěna aplikace, takže pro úpravu je potřeba zvukový soubor nahrát do této složky a po zpracování efektem je možno jej najít pod pozměněným názvem (jak bylo zmíněno výše).

### 4.1.1 Doporučené nastavení efektu

Po spuštění aplikace je možno upravovat zvukové soubory na základě volitelných parametrů. Simulace pohybu akustického zdroje je nejvíce markantní při nízké otáčecí frekvenci. Jednotlivé trajektorie se liší použitím různých časových map, což se projevuje na rychlosti pohybu zdroje mezi jednotlivými body.

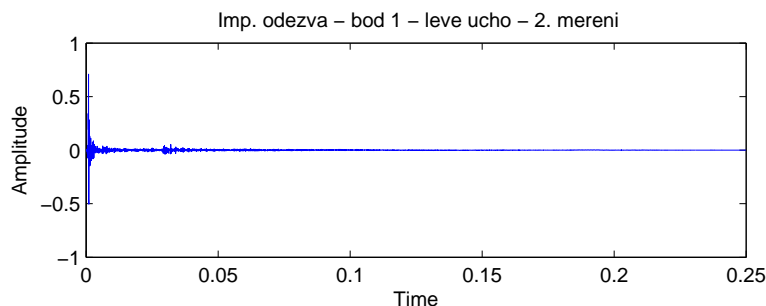
- Funkce sinus – LeftRight,
- Trojúhelníkový impuls – LeftRight2, FrontBack,
- Pila (Rampa) – Triangle, Rectangle, Circle.

Mezi doporučená nastavení v rámci prostoru z prvního měření, které bylo jednodušší, bych zařadil volby LeftRight, LeftRight2 a FrontBack. Pro prostor větší je znovu efekt nejlépe znatelný u trajektorie zleva doprava. Při pomalé otáčecí frekvenci lze velmi dobře rozeznat pohyb zvukového zdroje po trasách Triangle, Rectangle i Circle.

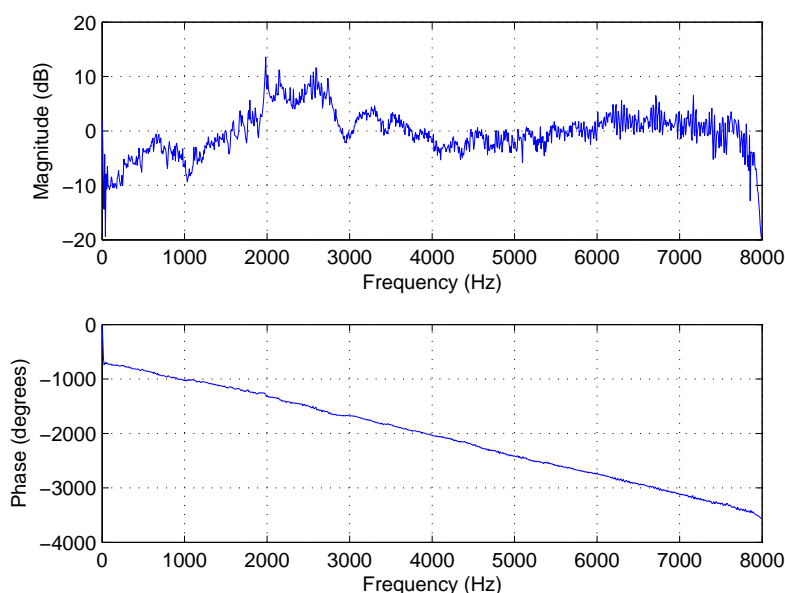
Výběrem prostoru koupelny je efekt neměnný při jakékoliv kombinaci trajektorie a otáčecí frekvence. Tato volba slouží pouze pro simulaci odrazu zvukových vln v tomto prostoru.

## 4.2 Ukázky signálů a jejich spektrogramů

Průběh impulsní odezvy použité v této ukázce je znázorněn na obrázku 4.2, její frekvenční charakteristika na obrázku 4.3.

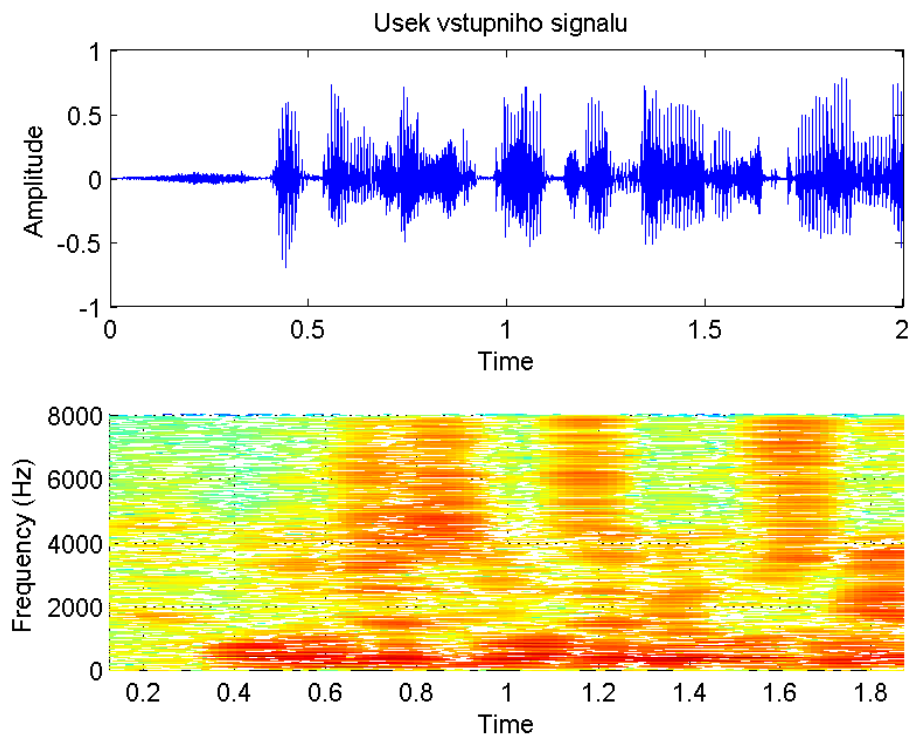


Obrázek 4.2: Ukázka impulsní odezvy

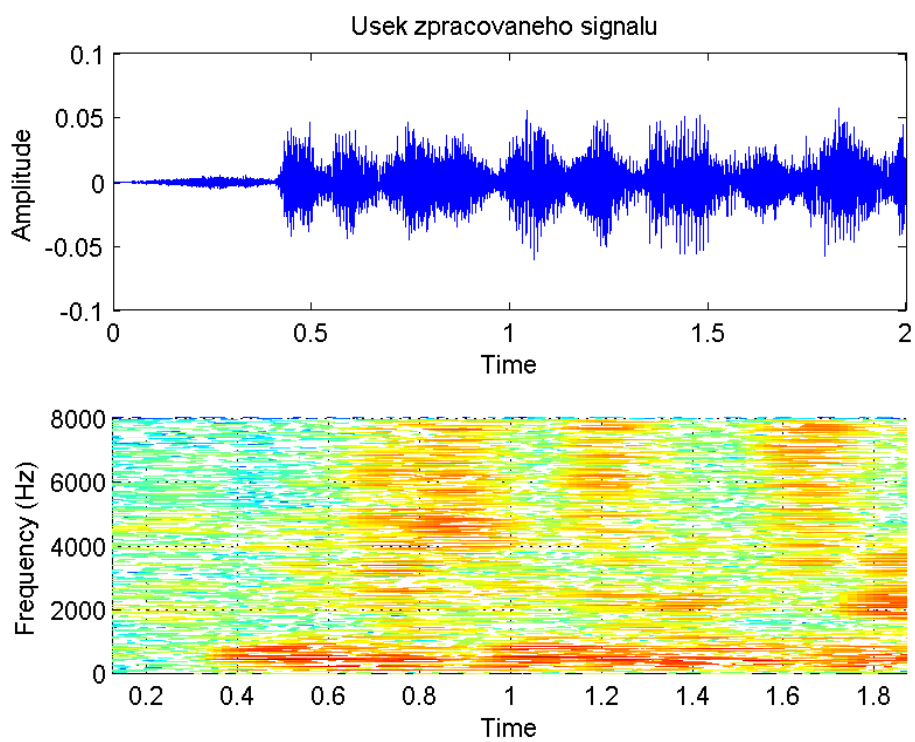


Obrázek 4.3: Frekvenční charakteristika impulsní odezvy

Na obrázku 4.4 je znázorněn průběh úseku původního signálu ve formě mluveného slova. Provedením konvoluce signálu s impulsní odezvou dojde ke zkreslení signálu, jehož průběh je znázorněn na obrázku 4.5. U původního signálu je dobře patrné oddělování jednotlivých slov, u zpracovaného je obtížné rozpoznat mezery mezi slovy, protože jsou zaplněny odrazy zvuku. Zpracovaný signál je méně hlasitý, protože jej impulsní odezva zeslabuje. Porovnáním spekter obou signálů je vidět, že spektrum zpracovaného signálu je více rozmazané.



Obrázek 4.4: Signál před zpracováním



Obrázek 4.5: Signál po zpracování



# Závěr

Výsledkem této bakalářské práce je funkční aplikace, která umí zpracovávat zvukové soubory ve formátu WAV podle naprogramovaných algoritmů. Jak jsem již předeslal v úvodu této závěrečné zprávy, šlo o realizaci efektu s vybavením částečně amatérským. Cílem tedy bylo hlavně proniknout do problematiky zpracování digitálních signálů a výpočtu impulsní odezvy. Výstup práce sice nedosahuje zvukových kvalit profesionálních produktů, nicméně jádro aplikace stojí na principiálně správných a funkčních algoritmech.

Efekt simulace pohybu zvukového zdroje po určité trajektorii je znatelný nejlépe při malých rychlostech. Při vyšších rychlostech není snadné sluchem rozpoznat přesnou trajektorii. Je to zřejmě z toho důvodu, že naměřená síť bodů by mohla být mnohem hustší než ta, na které jsme měření realizovali. Měření impulsních odezev je vždy zatíženo chybou, protože měříme zároveň charakteristiku aparatury a různé ruchy, které ovlivňují výsledek. Tímto se vracím ke zmíněným amatérským podmínkám, protože v rámci univerzity nebyla k dispozici místnost, která by byla specializována na práci s akusticky náročným materiálem. Doufám, že by tato práce mohla urychlit zlepšení těchto podmínek, protože škol, které se touto problematikou zabývají, je v České republice jen několik. V budoucnu by tato bakalářská práce mohla být pro případné řešitele podkladem pro naprogramování efektu Stereopanner Universal v jiném programovacím jazyce jako samostatnou aplikaci, nezávislou na prostředí Matlab.

# Literatura

- [1] Zölzer, U. et al: *DAFX Digital Audio Effects*, John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0 471 490078 4
- [2] Zenkl, Luděk: *ABC Hudební nauky*, Editio Bärenreiter Praha spol s r. o., 2000, ISBN 80-86385-01-9
- [3] Šula, Roman: *Varhany Hammond* [online]. [cit. 2011-05-18]  
URL: <<http://www.asu.cas.cz/sula/DTP/Hammond.pdf>>
- [4] Koldovský, Zbyněk: *Poznámky k předmětu BSI* [online]. [cit. 2011-12-20]  
URL: <<http://itakura.kes.tul.cz/zbynek/pubs/BSI.pdf>>
- [5] Koldovský, Zbyněk: *Poznámky k předmětu PZS* [online]. [cit. 2011-12-20]  
URL: <<http://itakura.kes.tul.cz/zbynek/pubs/PZS.pdf>>
- [6] Wikipedie: *Variace (Josef Vobruba)* [online]. [cit. 2011-12-22]  
URL: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Variace\\_%28Josef\\_Vobruba%29](http://cs.wikipedia.org/wiki/Variace_%28Josef_Vobruba%29)>
- [7] *Levinson–Durbin Algorithm and Signal Modeling* [online]. [cit. 2012-01-02]  
URL: <[http://afshin.sepehri.info/projects/ADSP/LevinsonDurbin/levinson\\_durbin.htm](http://afshin.sepehri.info/projects/ADSP/LevinsonDurbin/levinson_durbin.htm)>
- [8] STAN Guy-Bart, EMBRECHTS Jean-Jacques, ARCHAMBEAU Dominique: *Comparison of different impulse response measurement techniques* [online]. [cit. 2012-01-02]  
URL: <<http://www.bg.ic.ac.uk/research/g.stan/ArticleJAES.pdf>>
- [9] *Matlab Documentation – Toeplitz matrix* [online]. [cit. 2012-01-02]  
URL: <<http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/toeplitz.html>>

# Příloha A

## Zdrojové kódy

### A.1 odezva.m

```
function [hL hP] = odezva(leveUcho, praveUcho, speakerMic)
L = wavread(leveUcho);
P = wavread(praveUcho);
sig = wavread(speakerMic);

L = resample(L, 16000, 44100);
P = resample(P, 16000, 44100);
sig = resample(sig, 16000, 44100);

[auxL hL] = mmse(sig',L',4000,0);
[auxP hP] = mmse(sig',P',4000,0);
```

### A.2 mmse.m

```
function [esig wchan]=mmse(microphones,sig,L,delay)

if nargin<4
    delay=floor(L/2);
end
```

```

m=size(microphones,1);

esig=zeros(1,length(microphones)+L-1);

wchan=zeros(m,L);

%R=Q*Q';
R=zeros(m*L);
h=zeros(m*L,1);
for i=1:m
    for j=i:m
        r=xcorr(microphones(i,:),microphones(j,:),L-1);
        Rij=toeplitz(fliplr(r(1:L)),r(L:end));
        R((i-1)*L+1:i*L,(j-1)*L+1:j*L)=Rij;
        R((j-1)*L+1:j*L,(i-1)*L+1:i*L)=Rij';
    end
end

re=[zeros(1,delay) sig(1:end-delay)];
for i=1:m
    r=xcorr(microphones(i,:),re,L-1);
    h((i-1)*L+1:i*L)=fliplr(r(1:L))';
end
%w=R\h;
w=(R+0.0001*eye(size(R)))\h;
for i=1:m
    wchan(i,:)=w((i-1)*L+1:i*L)';
    esig=esig+conv(wchan(i,:),microphones(i,:));
end

```

### A.3 fcn\_SU\_LeftRight.m

```
%% stereopanner universal - LeftRight
% toto je verze programu pro trajektorii zleva doprava

function [y outputName]= fcn_SU_LeftRight(filename,speed,space)
[dataL, fs, nbits] = wavread(filename);
if fs > 16000
    dataL = resample(dataL, 16000, fs);
end

[rows, cols] = size(dataL);
if cols == 2
    xL=dataL(:,1);
    xR=dataL(:,2);
else
    x = dataL(:,1);
end

%f = 0.4;
f = speed;
Fs = 16000;

%% serazeni impulznich odezev do pole

if cols == 2
    lenx = length(xL); % delka signalu
else
    lenx = length(x);
end

Ny = 4000;
Nx = 4000; % velikost useku signalu x,
N = Nx + Ny - 1; % hodnota by mela odpovidat N > Nx + Ny - 1
```

```

yL = zeros(lenx+N,1); % vystup programu
yR = zeros(lenx+N,1);

if cols == 2
    xL = [xL;zeros(N,1)];% prodlouzeni x o nuly
    xR = [xL;zeros(N,1)];
else
    x = [x;zeros(N,1)];
end

%% space identification
switch space
    case {1}
        disp('Mistnost B1 - LeftRight');
        n = 5; % pocet bodu kterymi prokladam trajektorii
        load impulseLeft.mat;
        load impulseRight.mat;

        polePomHL = zeros(n,4000);
        polePomHR = zeros(n,4000);
        polePomHL(1,:) = hL(4,:); % impulseLeft v bode pocatecnim
        polePomHR(1,:) = hP(4,:); % impulseRight v bode pocatecnim
        polePomHL(2,:) = hL(15,:);
        polePomHR(2,:) = hP(15,:);
        polePomHL(3,:) = hL(5,:);
        polePomHR(3,:) = hP(5,:);
        polePomHL(4,:) = hL(17,:);
        polePomHR(4,:) = hP(17,:);
        polePomHL(5,:) = hL(3,:);
        polePomHR(5,:) = hP(3,:);

    case {2}

```

```

disp('Mistnost Obyvak - LeftRight');
n = 5;
load impulseLeftObyvak2.mat;
load impulseRightObyvak2.mat;

polePomHL = zeros(n,4000);
polePomHR = zeros(n,4000);
polePomHL(1,:) = hL(15,:);
polePomHR(1,:) = hP(15,:);
polePomHL(2,:) = hL(16,:);
polePomHR(2,:) = hP(16,:);
polePomHL(3,:) = hL(1,:);
polePomHR(3,:) = hP(1,:);
polePomHL(4,:) = hL(2,:);
polePomHR(4,:) = hP(2,:);
polePomHL(5,:) = hL(3,:);
polePomHR(5,:) = hP(3,:);

case {3}
disp('Koupelna');
n = 2;
load impulseLeftKoupelna.mat;
load impulseRightKoupelna.mat;
polePomHL = zeros(n,4000);
polePomHR = zeros(n,4000);
polePomHL(1,:) = hL(1,:);
polePomHR(1,:) = hP(1,:);
polePomHL(2,:) = hL(1,:);
polePomHR(2,:) = hP(1,:);
end

```

```

poleHL = zeros(n, 4000 + N - Ny);
poleHR = zeros(n, 4000 + N - Ny);

%% prodlouzeni impulsnich odezev o nuly
for i = 1: n
    poleHL(i,:) = [polePomHL(i,:), zeros(1, N-Ny)];
    poleHR(i,:) = [polePomHR(i,:), zeros(1, N-Ny)];
end      % impulsni odezva prodlouzena o nuly na delku N

%% fft impulsnich odezev
poleFL = zeros(n, 4000 + N - Ny);
poleFR = zeros(n, 4000 + N - Ny);
for i = 1:n
    poleFL(i,:) = fft(poleHL(i,:));
    poleFR(i,:) = fft(poleHR(i,:));
end

%% overlap-add fft algoritmus

poleFXHL = zeros(n, 4000 + N - Ny);
poleFXHR = zeros(n, 4000 + N - Ny);
poleyfxhL = zeros(n, 4000 + N - Ny);
poleyfxhR = zeros(n, 4000 + N - Ny);
poleyyl = zeros(lenx + N,n);
poleyyr = zeros(lenx + N,n);

i = 1;
while (i <= lenx)
    if cols == 2
        xxL = [xL(i:Nx+i-1); zeros(N-Nx,1)];
        FXL = fft(xxL);
        xxR = [xR(i:Nx+i-1); zeros(N-Nx,1)];

```



```

FXR = fft(xxR);

for j = 1: n
    poleFXHL(j,:) = FXL .* poleFL(j,:).';
    poleyfxhL(j,:) = real(ifft(poleFXHL(j,:)));
    poleyyL(i:N+i-1,j) = poleyyL(i:N+i-1,j) + poleyfxhL(j,:).';

    poleFXHR(j,:) = FXR .* poleFR(j,:).';
    poleyfxhR(j,:) = real(ifft(poleFXHR(j,:)));
    poleyyR(i:N+i-1,j) = poleyyR(i:N+i-1,j) + poleyfxhR(j,:).';
end

else
    xx = [x(i:Nx+i-1); zeros(N-Nx,1)];
    FX = fft(xx);

    for j = 1: n
        poleFXHL(j,:) = FX .* poleFL(j,:).';
        poleyfxhL(j,:) = real(ifft(poleFXHL(j,:)));
        poleyyL(i:N+i-1,j) = poleyyL(i:N+i-1,j) + poleyfxhL(j,:).';

        poleFXHR(j,:) = FX .* poleFR(j,:).';
        poleyfxhR(j,:) = real(ifft(poleFXHR(j,:)));
        poleyyR(i:N+i-1,j) = poleyyR(i:N+i-1,j) + poleyfxhR(j,:).';
    end

end

i = i + Nx - 1;
end
disp('Overlap-add hotov.');
```

%% smichani odezev do vystupu

```

xfeed = 0: (1/(n-1)) : 1;
yfeed = eye(n);
ti = 0 : (1/Fs): (length(yL)/Fs)-1/Fs;
xi = 0 : (1/Fs) : 1 - 1/Fs;
yPchip = zeros(n,length(xi));
for k = 1: n % mapa vah
    yPchip(k,:) = pchip(xfeed, yfeed(k,:), xi);
end
mapaCas = abs(sin(pi*ti*f));
for i = 1: length(yL)
    indexPchip = floor(mapaCas(i)*(Fs-1))+1;
    koefInterp=yPchip(:,indexPchip)';

    for k = 0: n-1
        yL(i) = yL(i) + (koefInterp(1,k+1)).*poleyL(i,k+1);
        yR(i) = yR(i) + (koefInterp(1,k+1)).*poleyR(i,k+1);
    end

end

yL=yL/(max(abs(yL)+0.0001));
yR=yR/(max(abs(yR)+0.0001));

y = [yL yR];
disp('Smichani odezev hotovo.');
```

%% zapis a prehrani vystupu

```

%soundsc(y, Fs);
outputName = strrep(filename, '.wav', '_LeftRight.wav');
wavwrite(y, Fs, outputName);
disp('Zapis hotov.');
```